

文章编号: 2096-1618(2021)03-0259-05

抑制 OFDM 系统峰均比的 DHT-SCF 联合算法

杨小璠, 李 鑫

(成都信息工程大学通信工程学院, 四川 成都 610225)

摘要:针对正交频分复用(OFDM)系统 PAPR 较高及传统 PAPR 抑制算法固有缺陷的问题,提出用离散 Hartley 变换(DHT)和简化限幅滤波算法(SCF)的联合算法抑制 PAPR。此算法在时域和频域上分别对 OFDM 信号进行不同的处理,在时域上先进行 DHT 变换,原始数据与变换矩阵相乘后使新数据序列有更低的非周期自相关性,降低大峰值信号出现的概率。在频域上,运用 SCF 算法对信号进行限幅滤波,达到进一步抑制系统峰均比的目的。实验表明,所提算法在保证 BER 性能的前提下,能达到 4 次传统迭代限幅滤波 PAPR 抑制效果且其计算复杂度远远小于 4 次传统迭代限幅滤波算法。

关键词:无线通信;OFDM;峰均比;离散 Hartley 变换;简化限幅滤波算法

中图分类号:TN929.5

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2021.03.003

0 引言

正交频分复用(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)技术因其频谱效率高和抗多径能力较强,已经成为了 4G 关键物理层技术及 5G 多载波传输的备选方案之一。而目前 OFDM 系统最主要的缺陷是其峰均比(peak to average power ratio, PAPR)过高。高 PAPR 会使信号产生带内非线性失真和带外辐射,这样带来的直接影响是系统的误码率(bit error rate, BER)上升及相邻信道间频谱干扰。因此采取措施来抑制 PAPR 变得至关重要^[1]。

目前的 PAPR 抑制技术分三大类:预畸变类^[1]、概率类^[2-3]及编码类^[4]。其中,限幅技术因实现简单且抑制 PAPR 效果好而被广泛应用,但 CF 技术会使系统产生较高误码率,因此文献[5]提出迭代限幅滤波(iterative clipping and filtering, ICF)算法来改善系统 BER 性能,但多次迭代会增加系统复杂度,为解决这一问题,文献[6]提出了 OICF(optimized iterative clipping and filtering)用二阶锥规划模型设计滤波器来代替矩形滤波器。除此之外,文献[7]和文献[8]分别提出了深限幅(deep clipping)算法和简化限幅滤波(simplified clipping and filtering)算法,它们用不同的方式使一次迭代实现多次迭代限幅的效果,加快了算法的收敛速度。除此之外,因 DHT(discrete hartley transform)变换不会造成信号失真,近几年也被广泛用于抑制 PAPR。

因此为使系统得到更优秀的 PAPR 抑制性能,提出 DHT 变换与 SCF 算法的联合算法。仿真结果表明,本文算法与单独使用 DHT 变换和 SCF 算法相比,能达到更好的 PAPR 抑制效果,且有较好的 BER 性能。

1 OFDM 系统模型及其定义

OFDM 系统主要思想是将高速的串行比特流分配到低速并行的正交子信道上传输。其发射端实现过程主要是输入的二进制 bit 序列经过 PSK 或 QAM 星座图映射、串并转换、 N 点 IFFT 变换产生离散时域信号,再经过添加循环前缀、并串转换、数模转换等操作得到连续时域信号,最后经过上变频处理由 HPA 发射出去,接收端可以看作是发射端的逆操作。OFDM 系统模型如图 1 所示。

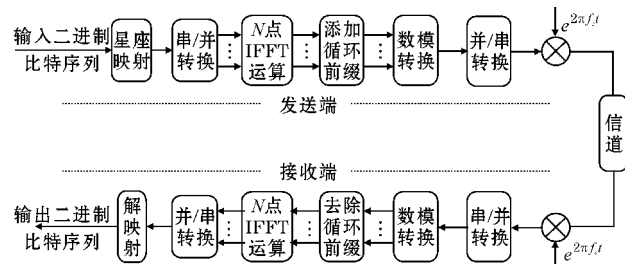


图1 OFDM 系统模型

若假设 OFDM 系统包含 N 个子载波,用 $X_k = \{X_0, X_1, \dots, X_{N-1}\}$ 表示调制 OFDM 信号,那么经 N 点傅里叶逆变换(IFFT)后,OFDM 信号的时域信号 x_n 可以表示成:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi kn/N}, n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (1)$$

那么 OFDM 信号的峰均比 PAPR 定义为

$$\text{PAPR}(x_n) = 10 \lg \frac{\max\{|x_n|^2\}}{E\{|x_n|^2\}} \text{dB} \quad (2)$$

其中, $\max\{|x_n|^2\}$ 表示信号功率的最大值, $E\{|x_n|^2\}$ 表示信号功率的平均值, PAPR 的单位为 dB。

一般情况下, 用互补累积分布函数 (complementary cumulative distribution function, CCDF) 来描述 PAPR 的分布情况, CCDF 表示的是峰均比大于某一门限值 z 的概率, 其数学表达式为

$$P(\text{PAPR} > z) = 1 - (1 - e^{-z^2})^N \quad (3)$$

2 所用 PAPR 抑制算法

2.1 DHT 变换

DHT 变换可以将实数序列 $x_n = \{x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-1}\}$ 转换成一个新的具有相同长度且仍为实数的序列 $H_k = \{H_0, H_1, H_2, \dots, H_{N-1}\}$, 因此可以将 N 点 DHT 定义为

$$H_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \left[\cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right] = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \text{cas}\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \quad (4)$$

其中, $k=0,1,\dots,N-1$, $\text{cas}\theta = \cos\theta + \sin\theta$ 。

$N \times N$ 的 DHT 预编码矩阵 \mathbf{P} 可以定义为

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & \cdots & p_{0(N-1)} \\ p_{10} & p_{11} & \cdots & p_{1(N-1)} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{(N-1)0} & p_{(N-1)1} & \cdots & p_{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

则可以得到 DHT 预编码矩阵 \mathbf{P} 中的元素为

$$p_{mn} = \text{cas}\left(\frac{2\pi mn}{N}\right) \quad (6)$$

其中, $0 \leq m, n \leq N-1$, DHT 预编码矩阵 \mathbf{P} 为可逆矩阵。那么经过 DHT 变换后的频域信号为 $\mathbf{Y} = \mathbf{P}\mathbf{X}$, 因此这里有

$$Y_m = \sum_{n=0}^{N-1} p_{mn} \cdot X_n, n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (7)$$

所以基于 DHT 预编码的 OFDM 系统的时域信号可以表示成:

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} Y_m \cdot e^{j2\pi kn/N}, n=0,1,2,\dots,N-1 \quad (8)$$

2.2 SCF 算法

传统限幅算法是抑制 PAPR 方法中最简单的。该方法预先指定门限值, 然后对超过门限值的子载波进

行剪波处理, 而未超过门限值的子载波保持原状, 限幅操作可以表示为

$$x_c(n) = \begin{cases} x(n), & |x(n)| \leq A \\ Ae^{j\angle x(n)}, & |x(n)| > A \end{cases} \quad (9)$$

其中, $\angle x(n)$ 为 $x(n)$ 的相位, A 为预先设定的限幅门限, 其由限幅比 CR 所决定, A 与 CR 之间的关系可以表示成:

$$A = CR \cdot \sigma \quad (10)$$

虽然限幅法实现简单且有较好 PAPR 抑制能力, 但是限幅是一个非线性过程, 会产生限幅噪声, 限幅噪声可以表示为

$$f(n) = x(n) - x_c(n) \quad (11)$$

限幅噪声会导致频域产生带内失真和带外辐射, 其中一般通过频域滤波的方式来消除带外辐射, 这样会造成信号的峰值再生, 从而使得算法的 PAPR 抑制能力减弱, 所以为了抑制峰值再生带来的影响, 有人提出了传统 ICF 算法。但有实验结果表明传统 ICF 算法经 3 次迭代后, 收敛速度会变慢, 需要多次迭代才能收敛到期望值, 这样会增加系统计算复杂度。

因此提出简化限幅滤波 (SCF) 算法来解决这一问题, 在 SCF 算法中, 首先和 ICF 算法一样进行时域限幅得到时域限幅噪声, 然后对时域限幅噪声进行 FFT 变换得到频域限幅噪声 F_k , 再进行滤波操作得到频域限幅滤波噪声 \hat{F}_k , 其表达式为

$$\hat{F}_k = \begin{cases} 0 & N/2 \leq k \leq LN - N/2 \\ F_k & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

其中, L 为过采样因子, N 为子载波数, 最后对频域限幅滤波噪声进行适当缩放, 缓解滤波带来的影响, 得到频域信号 \hat{X}_k :

$$\hat{X}_k \approx X_k - \beta \hat{F}_k \quad (13)$$

其中 X_k 为经过调制后的频域信号, 且这里将缩放因子 β 定义为

$$\beta \approx \frac{1 - (1 - \alpha)^{\frac{3N}{2}}}{1 - (1 - \alpha)^{\frac{3}{2}}} \quad (14)$$

其中, N 为子载波的个数, α 的表达式为

$$\alpha = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{3}\pi} \cdot \frac{\sigma}{A} \quad (15)$$

2.3 改进算法

由于 SCF 算法抑制 PAPR 的能力十分有限, 不能达到一些系统对 PAPR 抑制性能的要求, 为了达到理想的 PAPR 抑制效果, 要对算法进行改进, 最简单的方法就是进行算法联合, 结合各自的优势, 减弱每种算法在系统中表现出来的缺陷, 在选择要联合的算法时, 要

在系统的各个性能指标之间权衡,目标是在较小损失算法其他性能指标的前提下,极大地提升算法的 PAPR 抑制性能,因 SCF 算法过程是非线性的,会对系统的 BER 产生不利影响,所以其联合算法不能再选择非线性方法,且不会带来较高的计算复杂度,因此选择 DHT 变换。DHT 变换不会造成信号失真,将 SCF 算法与 DHT 变换进行结合,可以实现在增加较小的计算量情况下,便能使算法的 PAPR 抑制性能有一定程度的提升,且误码率性能不会受到影响。DHT-SCF 算法原理图如图 2 所示。

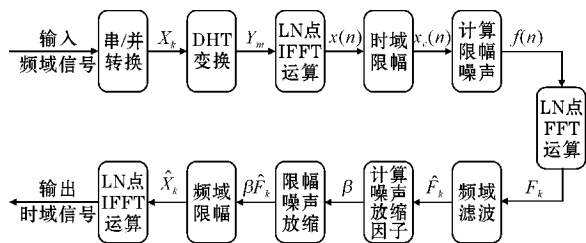


图2 DHT-SCF 联合算法原理图

改进算法具体步骤如下:

输入二进制 bit 序列首先经过 QPSK 调制得到频域信号 X_k ;

对频域信号 X_k 作 DHT 变换得到 Y_m ,再经过 LN 点 IFFT 变换生成时域信号 $x(n)$;

对 $x(n)$ 进行限幅操作后得到 $x_c(n)$,并计算限幅噪声 $f(n)$;

对 $x(n)$ 进行 FFT 运算后得到 F_k ,再进行滤波处理后得到 \hat{F}_k ;

通过计算得到频域信号 $\hat{X}_k = X_k - \beta\hat{F}_k$;

对 \hat{X}_k 进行 LN 点 IFFT 运算后输出信号 \hat{x}_n ;

3 结果分析

3.1 仿真结果

为验证 DHT-SCF 联合算法的可行性和有效性,进行了一系列的仿真实验。仿真参数设置如下:OFDM 系统调制方式采用 QPSK 调制,子载波个数 $N=2^M$ (M 为正整数),DHT 维数为 N ,过采样因子 $L=4$ 。

图 3 给出了 DHT-SCF 算法与传统 ICF 算法、SCF 算法及 DHT 算法的 CCDF 性能曲线。由图 3 可知, DHT-SCF 算法抑制 PAPR 的能力优于另外几种算法,在 $\text{CCDF}=10^{-3}$ 时,相比原始信号、DHT 变换、SCF 算法、第一次 ICF 算法、第二次 ICF 算法以及第三次 ICF 算法, DHT-SCF 算法分别优化了 5.3 dB、3.2 dB、0.5 dB、1.6 dB、0.7 dB、0.3 dB, DHT-SCF 算法抑制

PAPR 的能力与第四次 ICF 算法基本相同,且大大降低了传统 ICF 算法的计算复杂度。

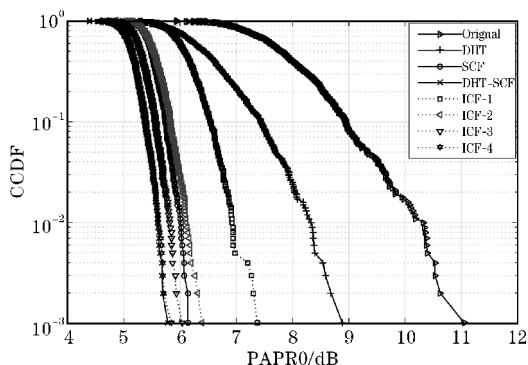


图3 DHT-SCF 算法与其他算法 CCDF 性能曲线对比

图 4 给出了不同子载波下, DHT-SCF 算法的 CCDF 性能曲线。由图 4 可知,在 $\text{CCDF}=10^{-3}$ 处, DHT-SCF 算法采用低阶调制方式表现出更优秀的 PAPR 抑制性能。

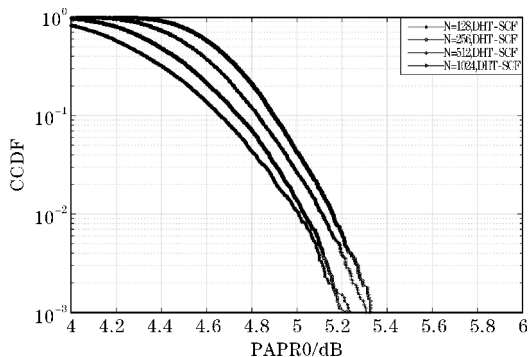


图4 不同子载波下 DHT-SCF 算法的 CCDF 性能曲线

图 5 给出了 DHT-SCF 算法在不同限幅门限下的 CCDF 性能曲线,比较了 $\text{CR}=[1.0:0.2:2.0]$ 情况下算法 PAPR 抑制能力。通过观察曲线图可知, DHT-SCF 算法能够有效地抑制 PAPR,当 $\text{CR}=[1.0:0.2:2.0]$ 时,在 $\text{CCDF}=10^{-3}$ 处, DHT-SCF 算法较原始信号相比分别改善了 5.2 dB、5.2 dB、5.0 dB、4.7 dB、4.2 dB、3.5 dB,由此推测此算法同 ICF 以及 SCF 算法一样,在 CR 较小时改善 PAPR 性能的能力较佳。

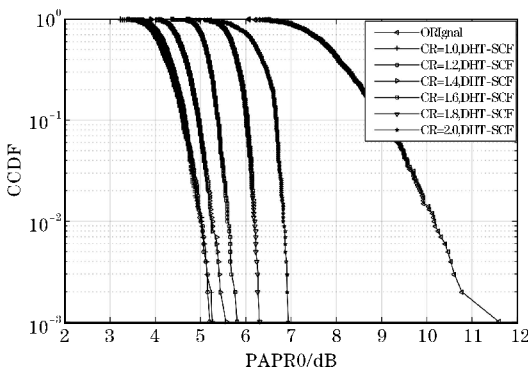


图5 不同 CR 下 DHT-SCF 算法的 CCDF 性能曲线

图6给出了传统ICF算法、DHT算法、SCF算法以及本文所提算法经过高斯白噪声信道后的误码率性能曲线。由图6可以看出,DHT-SCF算法误码率性能要优于传统ICF算法和SCF算法,但比原始信号和经DHT变换后的信号的误码率要稍差一些,所以新算法不仅有较好的PAPR抑制能力,BER性能也有所提高。

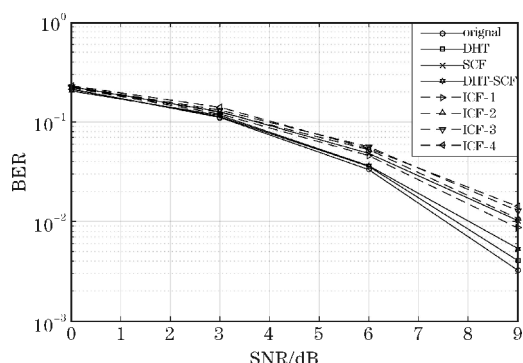


图6 DHT-SCF算法与其他算法误码率性能曲线对比

3.2 计算复杂度分析

DHT-SCF联合算法的计算量主要来自一次DHT变换和SCF算法,DHT变换为实数运算,且有快速算法, LN 点快速DHT变换需要 $1/2LN\log_2 LN + O(LN)$ 次实数乘法法和 $3/2LN\log_2 LN + O(LN)$ 次实数加法,SCF算法需要3次IFFT/FFT变换,一次 LN 点IFFT/FFT运算大概需要 $1/2LN\log_2 LN$ 次复数乘法和 $LN\log_2 LN$ 次复数加法,又因为实数运算的计算复杂度远远小于复数运算的计算复杂度,1次复数乘法相当于4次实数乘法法和2次实数加法,1次复数加法相当于2次实数加法,所以DHT-SCF联合算法的计算复杂度与单独使用两种算法相比仅有较小的增加。而传统的迭代限幅滤波算法的计算复杂度随着迭代次数增加而不断增加, K 次迭代需要 $(2K+1)$ 次IFFT/FFT变换,DHT-SCF算法与4次传统ICF算法的PAPR优化结果相同,4次传统ICF算法需要9次IFFT/FFT变换,所以在PAPR抑制性能相同的情况下,DHT-SCF联合算法的计算量较传统迭代限幅滤波算法有了明显的降低。

4 结束语

针对OFDM系统峰均比较高的问题,基于DHT算法和SCF算法有一定抑制PAPR的能力,但PAPR抑制性能还不够强的事实,提出了DHT-SCF联合算法并进行了相应的仿真实验。实验结果表明,本文算法用于抑制PAPR具有一定有效性和可行性,与传统ICF算法相比,此联合算法在保证BER性能不会受到影响

的前提下,可达到有效抑制PAPR和降低计算复杂度的目的。虽然DHT-SCF算法计算复杂度会高于单独使用DHT算法和SCF算法,但是远远小于传统ICF算法的计算复杂度,综合考虑各项性能指标,本文算法具有很大的实用价值。

参考文献:

- [1] Rahmatallah Y, Mohan S. Peak-To-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey And Taxonomy [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2013, 15(4):1567-1592.
- [2] 徐东明,杨杰. 基于改进的粒子群算法抑制OFDM的峰均比[J]. 西安邮电大学学报,2017, 22(4):10-14.
- [3] Lee K S, Cho Y J, Woo J Y, et al. Low-complexity PTS schemes using OFDM signal rotation and pre-exclusion of phase rotating vectors [J]. Iet Communications, 2016, 10(5): 540-547.
- [4] Wang C L, Ouyang Y. Low-complexity selected mapping schemes for peak-to-average power ratio reduction in OFDM systems [J]. IEEE Transactions on signal processing, 2005, 53(12):4652-4660.
- [5] 魏山林,金桂月,金基宇,等. DHT预编码的OFDM系统性能[J]. 大连工业大学学报,2015, (4):295-299.
- [6] Armstrong J. Peak-to-average power reduction for OFDM by repeated clipping and frequency domain filtering [J]. Electronics letters, 2002, 38(5): 246-247.
- [7] Wang Y C, Luo Z Q. Optimized iterative clipping and filtering for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Transactions on communications, 2010, 59(1): 33-37.
- [8] Kimura S, Nakamura T, Saito M, et al. PAR reduction for OFDM signals based on deep clipping [C]//2008 3rd International Symposium on Communications, Control and Signal Processing. IEEE, 2008: 911-916.
- [9] Sohn I, Kim S C. Neural network based simplified clipping and filtering technique for PAPR reduction of OFDM signals [J]. IEEE Communications Letters, 2015, 19(8): 1438-1441.
- [10] Schmidt J F, Romero D, López-Valcarce R. Active interference cancellation for OFDM spectrum

- sculpting: Linear processing is optimal [J]. IEEE Communications Letters, 2014, 18(9): 1543–1546.
- [11] 高静,汪晋宽,解志斌. 基于改进粒子群优化的部分传输序列峰均比降低研究[J]. 系统仿真学报,2009,21(19):6091–6094.
- [12] 宋凡. 基于分段替换和粒子群的 PTS 降低 PAPR 算法[D]. 西安:长安大学,2015.
- [13] 李洲. OFDM 系统中峰均比抑制算法研究与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.
- [14] Hao M J, Lai C H. Precoding for PAPR reduction of OFDM signals with minimum error probability[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2009, 56(1): 120–128.
- [15] Wang L, Tellambura C. A simplified clipping and filtering technique for PAR reduction in OFDM systems[J]. IEEE signal processing letters, 2005, 12(6): 453–456.

Joint DHT-SCF Algorithm for Suppression in OFDM Systems

YANG Xiaojun, LI Li

(College of Communication Engineering, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: In order to solve the problem of high PAPR in orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) system and the inherent defects of traditional PAPR suppression algorithm, a joint algorithm of discrete Hartley transform (DHT) and simplified clipping filter (SCF) is proposed to suppress PAPR in this paper. In this algorithm, the OFDM signal is processed differently in time domain and frequency domain. Firstly, DHT transform is carried out in time domain. After the original data is multiplied by the transformation matrix, the new data sequence will have lower aperiodic autocorrelation and the probability of large peak signal will be reduced. In the frequency domain, the SCF algorithm is used to limit the amplitude of the signal to further suppress the PAPR of the system. Experimental results show that the proposed algorithm can achieve the PAPR suppression effect of four times traditional iterative limiting filter under the premise of ensuring BER performance, and its computational complexity is far less than that of the four times traditional iterative limiting filtering algorithm.

Keywords: wireless communication; OFDM; peak to average power ratio; discrete Hartley transform; SCF algorithm